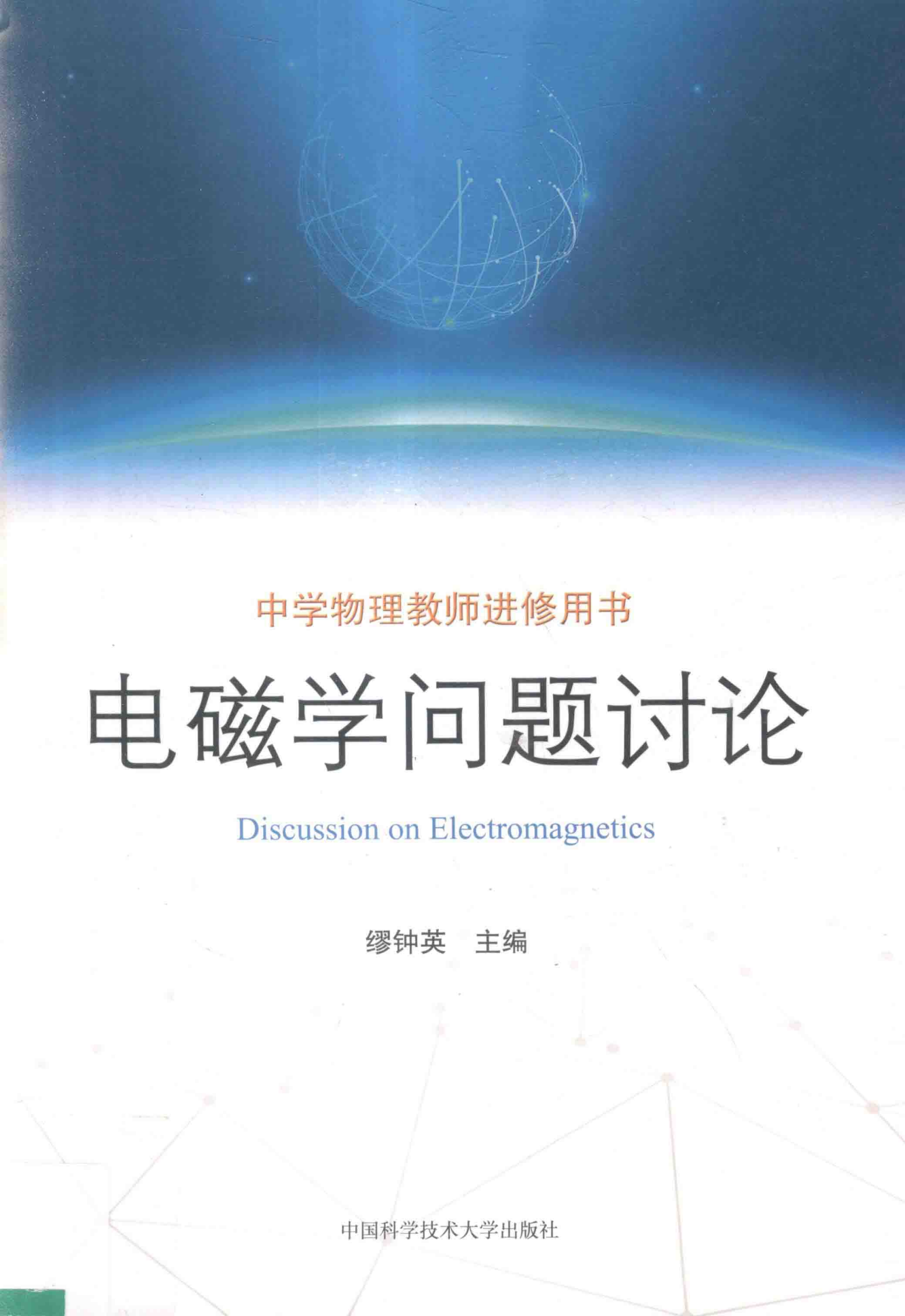




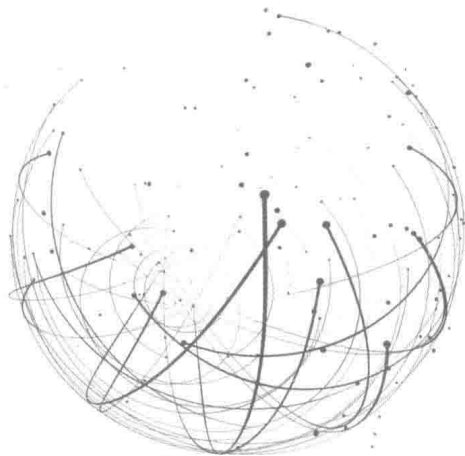
中学物理教师进修用书

电磁学问题讨论

Discussion on Electromagnetics

缪钟英 主编

中国科学技术大学出版社



中学物理教师进修用书

电磁学问题讨论

Discussion on Electromagnetics

缪钟英 主编

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书初版于1994年,作为教学参考书,供中学物理教师提高业务水平之用.2000年,经教育部师范教育司组织评审,本书被选为全国中小学教师继续教育教材.现在本书面向广大中学生和中学物理教师再次出版.

本书根据中学物理教师在驾驭教材时所应具有的知识 and 能力,针对教学需要,选择了101个专题详加分析论述,使读者能从较高的水平和较广泛的领域把握经典电磁学基础知识,这对于改革和丰富教学内容很有助益.本书对概念的阐述层次高,而又易懂,对问题分析深入,思路清楚鲜明,有助于提高读者分析问题的能力.

本书主要供高中生、非物理专业本科生学习使用,也可供高中物理教师 and 教学研究人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

电磁学问题讨论/缪钟英主编. —合肥:中国科学技术大学出版社,2018.8
ISBN 978-7-312-04430-4

I. 电… II. 缪… III. 电磁学—研究 IV. O441

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 054920 号

出版 中国科学技术大学出版社
安徽省合肥市金寨路 96 号,230026
<http://press.ustc.edu.cn>
<https://zgkxjsdxcs.tmall.com>
印刷 合肥市宏基印刷有限公司
发行 中国科学技术大学出版社
经销 全国新华书店
开本 787 mm×1092 mm 1/16
印张 30.5
字数 632 千
版次 2018 年 8 月第 1 版
印次 2018 年 8 月第 1 次印刷
印数 1—4000 册
定价 78.00 元

前 言

20 世纪 90 年代初,《力学问题讨论》出版后,人民教育出版社物理编辑室决定出版一套《中学物理教师之友》丛书,并邀我再组织编写其中一册,即《电磁学问题讨论》。在几位同事的通力合作下,《电磁学问题讨论》于 1994 年由人民教育出版社出版。2000 年,经教育部师范教育司(今教师工作司)组织评审,本书被选为全国中小学教师继续教育教材,于 2003 年 8 月由人民教育出版社再次出版。2017 年初,中国科学技术大学出版社与我约谈,表示愿重新出版《力学问题讨论》和《电磁学问题讨论》,并于 2017 年 7 月达成出版两书的共识。作为作者,我为这两本书至今仍有再版的价值而感到欣慰。同时,也真诚地感谢所有读者朋友;感谢人民教育出版社老一代的资深编审雷树仁先生和张同恂先生,以及人民教育出版社物理编辑室;感谢中国科学技术大学出版社为这两本书的再版而操劳的朋友们。

本书是一本系统阐述与专题讨论相结合的教学参考书,初衷是为中学物理教师教学业务的提高服务。各章由“基本内容概述”和“问题讨论”两部分组成。前者概述大学普通物理电磁学部分的基本内容,便于读者在阅读“问题讨论”部分时温习和查阅。“问题讨论”是本书的重点。我们结合大学电磁学和中学物理教学的实际,讨论了 101 个问题。这些问题概括为以下几类:

(1) 正确理解和应用电磁学的基本概念和规律应当注意的问题。

(2) 直接从中学物理教学实际中抽出的与指导中学物理教学和中学生物理竞赛有关的问题。在这些问题中,尽量给出具体题目或典型实例进行分析讨论。





(3) 有关电磁学发展的一些历史材料,着重阐明基本电磁学规律以及相关的物理思想和方法是怎样在历史上萌芽和最终建立起来的。

(4) 有关电磁学基本原理的应用,以及物理学发展前沿的一些有关电磁学的问题。

在编写风格上,我们力求简明扼要,深入浅出,使有大专水平的中学教师能够读而不觉其难;同时也希望能使有相当教学经验的教师在阅读本书对具体电磁学问题的深入细致的分析讨论时感到有新意而有所收益。

本书由四川大学物理系教授缪钟英主编,参加编写工作的还有:成都市中小学教育专家、成都市第十二中学特级教师郭鸣中,四川大学刘启耕副教授,成都大学谈有余副教授,四川教育学院罗启蕙副教授。在本书编写过程中,人民教育出版社雷树人编审和张同恂编审给予作者许多宝贵的帮助和具体的指导。在定稿过程中,人民教育出版社委托成都市物理学会为本书书稿组织了审稿会。审稿专家委员会由成都市物理学会理事长、四川大学郭士奎教授(主审),贺德昌、穆容生、龚廉光、叶长坚四位成都市中小学教育专家、中学特级教师,四川师范大学封小超教授、梁庭高教授,四川大学吴茂良教授、龚远芳教授和封向东教授等十位先生组成。人民教育出版社张同恂编审和李福利编辑出席了审稿会。审稿会对书稿的修改和完善提出了许多宝贵的意见和建议。四川大学池含芬女士为全书绘制了插图。作者谨对上述各位表示诚挚的谢意。

编著这类教学参考书是一件很有意义的工作,也是一件有相当难度的事。限于作者的水平和经验,我们也许做得不够好。我们衷心期望读者对本书提出批评和建议。

缪钟英

2018年6月



目 录

前言	(i)
----------	-------

第 1 章 静电场的基本规律

■ 基本内容概述

1.1 库仑定律	(1)
1.2 电场 电场强度	(2)
1.3 高斯定理	(4)
1.4 环路定理 电势	(6)
1.5 E 和 U 的关系	(8)

■ 问题讨论

1. 电磁现象的早期研究	(8)
2. 库仑定律的建立	(13)
3. 怎样理解电荷概念	(18)
4. 基本电荷的发现	(21)
5. 库仑定律的适用条件	(24)
6. 库仑定律的实验验证	(29)
7. 电荷间的电场力 场源电荷和试探电荷	(32)
8. 静电力与引力大小的比较	(34)
9. 静电场的基本性质及其形象描绘——电场线和等势面	(38)
10. 关于选取零电势点的几个问题	(46)
11. 带电粒子在稳定、均匀电场中的运动	(50)
12. 带电粒子在交变电场中的运动	(55)
13. 带电粒子在静止点电荷电场中的运动	(60)
14. 均匀带电球面的电场 应用举例	(64)
参考文献	(69)





第2章 静电场中的导体和电介质

■ 基本内容概述

2.1 静电场中的导体	(70)
2.2 电容 电容器	(71)
2.3 电介质及其极化	(73)
2.4 电位移矢量 D D 的高斯定理	(75)
2.5 E 和 D 的边界关系	(76)
2.6 静电场的能量和能量密度	(78)
2.7 静电场方程、边值问题及其唯一性定理	(79)

■ 问题讨论

1. 孤立导体表面的电荷分布和附近的场强	(81)
2. 应用电场线的性质讨论导体静电平衡问题	(86)
3. 导体空腔内外的电场 静电屏蔽	(90)
4. 电容器的电容公式 $C = \frac{Q}{U}$ 中的 Q 是指什么电荷?	(96)
5. 静电屏蔽在构成电容器中的作用	(98)
6. 在什么条件下串联电容器才能提高耐压能力	(103)
7. 充介质的电容器的电容	(105)
8. 关于静电能的几个问题	(110)
9. $E = \frac{E_0}{\epsilon_r}$ 成立的条件及其证明	(116)
10. 电介质在电场中受到的力	(118)
11. 电像法应用简介	(124)
参考文献	(130)

第3章 稳恒电流

■ 基本内容概述

3.1 电流稳恒的条件	(131)
3.2 欧姆定律	(133)
3.3 电功率 焦耳定律	(134)
3.4 电源 电动势	(136)
3.5 全电路欧姆定律和稳恒电路中的功能关系	(137)

■ 问题讨论

1. 从电流的发现到欧姆定律的确立	(139)
-------------------------	-------



2. 金属导电的经典微观理论简介	(143)
3. 稳恒电路中的电场和电荷的作用与分布	(147)
4. 关于电动势的定义和方向	(149)
5. 闭合电路中的两种场与欧姆定律	(150)
6. 化学电源电动势的形成机理	(152)
7. 接触电势差 温差电动势	(157)
8. 关于电压的讨论	(161)
9. 非线性元件	(165)
10. 超导电性和超导体	(170)
参考文献	(175)

第4章 直流电路

■ 基本内容概述

4.1 简单电路与复杂电路	(176)
4.2 基尔霍夫定律	(179)
4.3 线性复杂电路的几个等效定理	(180)

■ 问题讨论

1. 电路规范化方法	(183)
2. 电路结构或电阻变化所引起的参量变化	(186)
3. 电路故障分析	(188)
4. 黑箱问题与电路设计	(191)
5. 电学实验误差与实验方法、仪表、元件的选择	(197)
6. 有关电池组的几个问题	(206)
7. 补偿电路(电势差计)	(211)
8. 利用等势点简化电路计算	(212)
9. 利用 $Y \Leftrightarrow \Delta$ 网络代换简化电路	(217)
10. “无限梯形网络”的等效值计算	(219)
11. 惠斯通电桥实验中的几个问题	(224)
12. 含电容支路的简单电路	(228)
13. 含电容支路的直流复杂电路	(234)

第5章 稳恒磁场

■ 基本内容概述

5.1 磁场 磁感应强度	(238)
--------------------	-------





5.2 毕奥-萨伐尔定律	(239)
5.3 磁场的高斯定理和环路定理	(240)
5.4 磁感应强度 B 的计算	(241)
5.5 安培力	(243)
5.6 洛伦兹力 洛伦兹公式	(244)

■ 问题讨论

1. 电流磁效应的发现和毕奥-萨伐尔定律的建立	(244)
2. 安培定律是怎样建立的?	(248)
3. 电流之间的相互作用是否满足牛顿第三定律?	(254)
4. 关于磁感应强度的定义	(258)
5. 安培力与洛伦兹力的关系	(260)
6. 安培力做功的机理	(265)
7. 磁场对载流导线和线圈的作用	(268)
8. 静磁场与静电场的比较	(274)
9. 电场和磁场的变换	(278)
10. 电场力、洛伦兹力与参考系的关系	(284)
11. 霍尔效应	(288)
12. 带电粒子在磁场中的运动	(291)
13. 回旋加速器原理	(296)
14. 质谱计	(299)
15. 带电粒子在正交电场和磁场中的运动	(301)
16. 测量磁感应强度 B 的方法	(306)
参考文献	(311)

第6章 磁介质中的稳恒磁场

■ 基本内容概述

6.1 磁化强度、磁化电流和介质中的磁场	(312)
6.2 磁场强度 介质中稳恒磁场的基本方程	(313)

■ 问题讨论

1. 对磁性本质认识的历史过程	(315)
2. 顺磁质和抗磁质的磁化机制	(316)
3. 磁场的磁荷观点和电流观点	(321)
4. 铁磁质的磁化规律及其磁性起因	(323)
5. 磁感线	(327)



6. 铁粉为何沿磁场方向排列成线状?	(329)
7. 地磁场简介	(330)
8. 磁单极子	(335)
参考文献	(338)

第7章 电磁感应

■ 基本内容概述

7.1 电磁感应定律	(339)
7.2 动生电动势和感生电动势	(341)
7.3 自感和互感	(343)
7.4 磁能	(346)
7.5 暂态过程	(347)

■ 问题讨论

1. 电磁感应现象的发现	(350)
2. 楞次定律的表述及其实质	(352)
3. 由能量守恒定律导出电磁感应定律	(355)
4. 电磁感应定律的两种表述的比较	(356)
5. 从电磁感应的“佯谬”谈“通量法则”中的回路构成	(360)
6. 动生电动势公式中的 v 是相对于什么的速度?	(363)
7. 动生、感生电动势与参考系的选取有关	(365)
8. 金属细杆沿导轨在磁场中运动的规律	(368)
9. 电磁阻尼及其应用	(372)
10. 由安培力的冲量引起的运动中动生电动势的影响	(377)
11. 电子感应加速器原理	(382)
12. 线圈上的感应电动势与电势差	(385)
13. 演示自感现象应注意的问题	(391)
参考文献	(394)

第8章 交流电

■ 基本内容概述

8.1 正弦交流电的基本特征与表示方法	(395)
8.2 交流电路中的纯电阻、电感、电容元件	(398)
8.3 串联交流电路和并联交流电路	(401)



■ 问题讨论

1. 交流电的功率	(405)
2. 变化电流的有效值和平均值	(408)
3. 正弦交流电感性电路和电容性电路的相位差	(415)
4. 提高功率因数的实际意义和方法	(420)
5. 常用交流电表的工作原理	(423)
6. 关于理想变压器的几个问题	(428)
7. $U_{\text{线}} = \sqrt{3}U_{\text{相}}$ 、 $I_{\text{线}} = \sqrt{3}I_{\text{相}}$ 成立的条件	(434)
8. 电气安全保护——中线、零线、地线	(438)
9. 交流输电与直流输电	(442)
参考文献	(445)

第9章 电 磁 波

■ 基本内容概述

9.1 位移电流	(446)
9.2 麦克斯韦方程组	(447)
9.3 平面电磁波	(448)
9.4 电磁波谱	(450)
9.5 电磁波的能量密度和动量密度	(450)

■ 问题讨论

1. 电磁场理论建立的历史及其意义	(451)
2. 赫兹实验	(455)
3. 为什么电磁波在真空中也能传播?	(456)
4. 怎样理解电磁波的横波性?	(460)
5. 怎样理解 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{B}$ 同相位	(463)
6. 电磁波的三种速度	(467)
7. 关于电磁场的能量流动和动量	(471)
参考文献	(477)



第 1 章 静电场的基本规律

基本内容概述

1.1 库 仑 定 律

两个静止的点电荷之间的相互作用力的大小与它们的电量的乘积成正比,与它们之间的距离的平方成反比;作用力沿它们的连线,同号电荷相斥,异号电荷相吸.用 q_1 、 q_2 分别表示两点电荷的电量(代数值),用 r 表示它们之间的距离,则库仑定律可用公式表示为

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1.1)$$

如果 q_1 与 q_2 异号,则 F 为负,表示电荷互相吸引;如果 q_1 、 q_2 同号,则 F 为正,表示电荷互相排斥.式中 k 为比例系数,叫静电力常量,在国际单位制中,电量的单位是库(符号为 C),则有

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

其中 ϵ_0 是一个基本物理常量,叫做真空介电常量或真空电容率,其值为

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$$

如果用矢量 F_{12} 表示点电荷 q_1 受到的来自点电荷 q_2 作用的力, r_{12} 表示由 q_2 指向 q_1 的单位矢量,则库仑定律的矢量表达式为

$$F_{12} = F r_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} r_{12} \quad (1.2)$$



1.2 电场 电场强度

1.2.1 电场 静电场

电荷在其周围空间激发**电场**. 电场是一种特殊的物质形式. 电场的基本性质是对处在场中的电荷有作用力, 称为**电场力**. 电荷之间的作用是通过电场产生的. 如果空间有两个电荷, 那么每一个电荷都在空间激发电场. 电荷 1 受到的力是电荷 2 所激发的电场的电场力, 电荷 2 受到的力是电荷 1 所激发的电场的电场力.

静止电荷所激发的电场称为**静电场**. 以后把激发静电场的电荷称为**场源电荷**. 静电场中各个位置的场的性质不随时间而发生变化.

1.2.2 电场强度

为了定量地描述电场对场中电荷有作用力这一基本性质, 采用电量充分小^①的带正电的点电荷 q_0 作为试探电荷, 探测电场力的作用. 结果表明, 在任一给定位置, 作用于试探电荷的电场力的方向和比值 F/q_0 都是确定的, 与试探电荷量的大小无关, 只与该电荷的给定位置有关. 可见在任一位置上, 比值 F/q_0 的大小和方向是由电场本身的性质决定的, 于是把它定义为该点的**电场强度**, 简称**场强**, 用 E 表示:

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (1.3)$$

即场中任一点的电场强度矢量的方向与试探正电荷在该点受到的场力的方向相同, 其大小等于单位试探电荷在该点所受的场力. 场强不是场力, 而是场力的强度.

一般情形下, 静电场的场强矢量随位置而变, E 是矢量点函数 $E = E(x, y, z)$, 场强的空间分布 $E(x, y, z)$ 描述了静电场的空间分布. 空间各点场强的大小、方向都相同的电场是一种特例, 称为**匀强电场**(或**均匀电场**).

在 SI 制中, 场强的单位是牛/库或伏/米.

1.2.3 点电荷电场的场强

根据库仑定律和场强的定义, 静止的场源点电荷 q 激发的静电场的场强为

^① 见问题讨论 7.



$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (1.4)$$

其中, r 为场源电荷到场点的距离, $\mathbf{r}_0$ 为从场源到场点方向的单位矢量.

1.2.4 场强叠加原理 点电荷系的场强

场强叠加原理: 若干电荷激发的电场中, 任一点的场强 $\mathbf{E}$ 等于各个电荷在该点激发的场强 $\mathbf{E}_i$ 的矢量和, 即 $\mathbf{E} = \sum_i \mathbf{E}_i$.

应用叠加原理可得点电荷系 $q_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的场在场点 P 的场强为

$$\mathbf{E} = \sum_i^n \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \mathbf{r}_{i0} \quad (1.5)$$

其中, r_i 为从 q_i 到场点的距离, $\mathbf{r}_{i0}$ 为从 q_i 指向场点方向的单位矢量.

对于电荷连续分布的带电体场源, 应用叠加原理进行矢量积分运算即可求出场强:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_Q \frac{dq}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (1.6)$$

其中, dq 为带电体上的电荷元, r 为从 dq 到场点的距离, $\mathbf{r}_0$ 为单位矢量, 积分遍及带电体的全部电荷 Q .

对于电荷为体分布、面分布或线分布的情况, 电荷元可分别表示为

$$dq = \begin{cases} \rho dV & (\rho \text{ 为体电荷密度, } dV \text{ 为体积元}) \\ \sigma dS & (\sigma \text{ 为面电荷密度, } dS \text{ 为面积元}) \\ \eta dl & (\eta \text{ 为线电荷密度, } dl \text{ 为线元}) \end{cases}$$

这样, 式(1.6)可相应地变为体积分、面积分或线积分.

应该用解析方法进行矢量积分, 即先计算电荷元 dq 的元场强 $d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \mathbf{r}_0$ 沿坐标轴的分量 dE_x, dE_y, dE_z , 再分别积分求出 E_x, E_y, E_z , 最后确定场强的大小 E 和方向.

1.2.5 电场线

如果在电场中作出许多曲线, 使这些曲线上每一点的切线方向和该点的场强方向一致, 并使这些曲线的数密度与该处的场强大小成正比, 那么, 这样作出的曲线叫做该电场的**电场线**. 电场线形象地描绘了电场中场强的分布情形.

电场线具有以下两个主要的性质:

(1) 电场线起于正电荷(或来自无限远处), 止于负电荷(或伸向无限远处), 不会在无电荷处中断.



(2) 静电场中的电场线不形成闭合线.

1.2.6 点电荷在电场中受的力

点电荷 q 在外电场中受的场力为

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} \quad (1.7)$$

其中 $\mathbf{E}$ 为点电荷所在位置的电场强度.

相距为 l 、电量分别为 $\pm q$ 的两点电荷组成的电荷系称为电偶极子,其特征用电偶极矩 $\mathbf{p} = ql$ (方向从负电荷指向正电荷)表示.电偶极子在匀强电场中受力矩作用,这个力矩矢量为

$$\mathbf{M} = ql \times \mathbf{E} = \mathbf{p} \times \mathbf{E} \quad (1.8)$$

1.3 高斯定理

1.3.1 电通量

设在场中的某一面元 dS (在此小范围内场强可视为均匀的) 的法线方向与该面元处的场强的方向成 θ 角,则面元 dS 在垂直于场强方向的投影面积为 $dS_{\perp} = dS \cos \theta$. 过面元 dS 的元电通量定义为

$$d\Phi = E dS_{\perp} = E dS \cos \theta \quad (1.9)$$

即通过面元 dS 的电通量等于该处场强的大小与面元在垂直于场强方向的投影面积的乘积. 在用电场线形象描绘电场分布的方法中,电通量的大小等于穿过该面元的电场线数目.

如果面元用矢量 $d\mathbf{S} = dS\mathbf{n}$ 表示,其中 dS 表示面元的大小, $\mathbf{n}$ 为面元的法线方向单位矢量,则元电通量可表示为场强与面元矢量的点积:

$$d\Phi = \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \quad (1.10)$$

对于一个有限大的曲面 S ,通过它的电通量为

$$\Phi = \iint_S E \cos \theta dS = \iint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}$$

对于一个闭合曲面,通过此闭合曲面的电通量为

$$\Phi = \oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \quad (1.11)$$

这里规定面元 dS 的方向为闭合曲面的外法线方向,因此,从内向外穿出闭合面



的电通量为正,反之为负.式(1.11)中的 Φ 表示穿过闭合面的电通量的代数和.如果从内向外穿出的电通量多于从外向内穿进的电通量,则 $\Phi>0$;反之 $\Phi<0$.如果穿进和穿出的电通量相等,则 $\Phi=0$.

事实上,所有的矢量场都可以按上述规定定义该矢量的通量.

1.3.2 高斯定理

通过任一闭合曲面的电通量等于该闭合面所包围的所有电荷电量的代数和除以 ϵ_0 ,与闭合面外的电荷无关,这就是高斯定理.其数学表达式为

$$\Phi \equiv \oiint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{q_i \text{ 在 } S \text{ 内}} q_i \quad (1.12)$$

高斯定理可以由库仑定律和场强叠加原理导出.式中, $\mathbf{E}$ 是空间所有电荷激发的电场在闭合面上的场强;而 $\mathbf{E}$ 对闭合面的积分,即通过闭合面的电通量,则只由闭合面以内的电荷的代数和决定.

高斯定理揭示了场和场源的联系,表明静电场是有源场,且源于正电荷,汇于负电荷.

1.3.3 应用高斯定理求具有对称分布的带电体场源的场强分布

当空间电荷分布具有某种对称性时,可以适当选取也具有一定对称性的闭合曲面(高斯面),使得在面上的场强的法向分量为零或为常数,对这样的高斯面应用高斯定理即可求出场强分布(见表1.1).

表 1.1 具有对称形状的一些均匀带电体所激发的电场的 E 和 U

带电体(场源)	场强分布 E	电势分布 U
半径为 R 的均匀带电球壳,电量为 Q	$0 \quad (r < R)$ $\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (r > R)$	$\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R} \quad (r < R)$ $\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (r \geq R)$
半径为 R 的均匀带电球体,电量为 Q	$\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^3} r \quad (r \leq R)$ $\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (r \geq R)$	$\frac{Q}{8\pi\epsilon_0 R} \left(3 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (r \leq R)$ $\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (r \geq R)$
无限大均匀带电平面,面电荷密度为 σ	$\frac{\sigma}{2\epsilon_0}$ (方向垂直于带电平面)	$-\frac{\sigma}{2\epsilon_0} x$ (x 为到平面的距离,取 $x=0$ 处 $U=0$)
半径为 R 的均匀带电圆盘,电荷量为 Q (在其轴线上的 E 和 U)	$\frac{Q}{2\pi R^2 \epsilon_0} \left(1 - \frac{x}{\sqrt{x^2 + R^2}}\right)$ (x 为场点到圆盘的距离)	$\frac{Q}{2\pi R^2 \epsilon_0} (\sqrt{R^2 + x^2} - x)$





1.4 环路定理 电势

1.4.1 静电场是保守场 环路定理

根据功的定义,在静电场中从一点 M 沿路径 l 移动电荷 q 到另一点 P ,电场力所做的功为

$$A = \int_M^P qE \cdot dl$$

根据由库仑定律得出的场强分布规律,不难证明,电场力所做的功由起点 M 和终点 P 的位置决定,而与所沿路径 l 无关.如果起点与终点重合,即沿任一闭合路径移动电荷 q ,则电场力对 q 所做的功为零:

$$\oint qE \cdot dl = 0 \quad (1.13)$$

这说明静电场力具有保守力的特征,静电场是保守场.

为了不计被移动的电荷量,突出电场本身所具有的上述性质,用电荷量除式(1.13),便得到

$$\oint E \cdot dl = 0 \quad (1.14)$$

即沿任一闭合路径移动单位正电荷,电场力做功为零.用数学语言表述为:场强矢量 E 沿任一环路的环量(线积分)等于零.这就是场强的环路定理.

1.4.2 静电势能

在力学中我们已知道,对任何保守力,存在与之相关的势能(或位能).作用于电荷 q 的电场力既然是保守力,就可引入电荷 q 在静电场中的静电势能 W :电场力对 q 所做的功等于静电势能的减量,即

$$\int_M^P qE \cdot dl = W_M - W_P = -(W_P - W_M) \quad (1.15)$$

如果规定电荷在 P 点的静电势能为零(零势点),那么,电荷在场中任一点 M 的静电势能等于从该点移动 q 到零势能点的过程中电场力所做的功,即

$$W_M = \int_M^{\text{零势点}} qE \cdot dl \quad (1.16)$$

应用点电荷 Q 的电场强度分布规律可知:如果取距场源电荷无限远为零电势能位置,那么,点电荷 q 在与场源电荷 Q 相距 r 处所具有的静电势能为

